

Література

- 1 Підвищення техніко-економічних показників буріння шляхом застосування амортизаторів коливань бурильної колони / Б.М.Польовий, В.М.Шопа, С.В.Величкович, З.Д.Червак // Вісник АН УРСР. – 1982. – № 1. – С.45–50.
- 2 Буровые оболочечные амортизаторы типа АПО / В.М.Шопа, С.В.Величкович, А.Н.Янкевич и др. // Нефтяная и газовая промышленность. – 1981. – № 4. – С.45–50.
- 3 Величкович А.С., Шопа В.М. Бурові амортизатори як засіб підвищення техніко-економічних показників буріння свердловин // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – №3. – С.16–18.
- 4 Величкович А.С., Величкович С.В., Шопа В.М. Комплекс засобів віброзахисту та регулювання динамічного режиму бурильної колони. – Івано-Франківськ: Сіверсія ЛТД, 2000. – 86 с.
- 5 Оболочечные упругие элементы: основы конструирования / В.М.Шопа, С.В.Величкович, И.П.Шацкий, И.И.Попадюк. – Львов, 1990. – 61 с. – (Препринт / АН УССР ИППММ; № 21–88).
- 6 Оболонкові пружини / В.М.Шопа, А.С.Величкович, С.В.Величкович та ін. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 92 с.
- 7 А.с. 1104319 СССР, МКИ F16F1/34. Амортизатор / В.М.Шопа, С.В.Величкович, Б.Н.Полевой, З.Д.Червак. – Оpubл. 23.07.84, Бюл. № 27.
- 8 Пат. РФ 2031270, МКИ 6F16F1/42. Амортизатор / С.В.Величкович, В.М.Шопа, П.Е.Кравец и др. – Оpubл. 20.03.95, Бюл. № 8.
- 9 А.с. 1670225 СССР, МКИ F16F1/40. Упругий элемент / С.В.Величкович, В.М.Шопа, И.П.Шацкий, И.И.Попадюк. – Оpubл. 15.08.91, Бюл. № 30.
- 10 А.с. 1073429 СССР, МКИ E21B17/07. Амортизатор колебаний бурильной колонны / С.В.Величкович, В.М.Шопа, Б.Н.Полевой и др. – Оpubл. 15.02.84, Бюл. № 6.
- 11 А.с. 1601315 СССР, МКИ E21B17/07. Забойный амортизатор / А.С.Величкович, С.В.Величкович. – Оpubл. 22.10.90, Бюл. № 39.
- 12 А.с. 637572 СССР, МКИ F16F1/40. Упругий элемент / В.М.Шопа, С.В.Величкович. – Оpubл. 15.12.78, Бюл. № 46.
- 13 Попадюк І.Й., Шацкий І.П., Шопа В.М. Механіка фрикційного контакту оболонок з деформівним заповнювачем: Монографія. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 180 с.
- 14 Бедзир А.А., Шацкий И.П., Шопа В.М. Неидеальный контакт в составной оболочечной конструкции с деформируемым заполнителем // Прикл. механика. – 1995. – 31, № 5. – С.25–29.
- 15 Шопа В.М., Попадюк І.Й., Бедзир О.О. Змішані задачі фрикційного контакту коаксіальних циліндричних оболонок і деформівного заповнювача // Мат. методи і фіз.-мех. поля. – 1998. – 41, №3. – С.103–108.

УДК 621.22+621.67+62.001.57

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА НА ОСНОВІ ЙОГО ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ

В.С.Костишин, П.М.Николин

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48003,
e-mail: erep@nuing.edu.ua

Разработана математическая модель центробежного насоса на основании термодинамического подхода, определены термодинамические параметры для серии центробежных насосов магистральных нефтепроводов. Произведен анализ эффективности установившихся режимов их работы.

The centrifugal pump mathematical model is worked out on the basis of thermodynamic approach. Thermodynamic parameters of this model are defined for centrifugal pump series of oil – trunk pipelines. Analysis of efficiency of steady-state operating regime of centrifugal pumps is made.

Постановка проблеми, актуальність та доцільність досліджень

На сьогодні все відчутніше постає питання енергозбереження не тільки в Україні, але й у світовому масштабі. Саме через нераціональне використання енергетичних ресурсів створюються проблеми із енергопостачанням споживачів. Однією із найбільш енергоємних галузей народного господарства є нафтогазова промисловість. Тут, в першу чергу, слід згадати нафтоперекачувальні станції, обладнані потуж-

ними електроприводними, зазвичай відцентровими агрегатами. Дотримання умов експлуатації та оптимізація робочих параметрів відцентрових насосів (ВН) дасть змогу підвищити надійність та ефективність роботи цих машин. Для того щоб визначити оптимальні параметри функціонування ВН необхідно створити таку математичну модель, яка б змогла адекватно відображати складні процеси енергетичних перетворень в таких машинах, що зв'язують між собою підсистеми різної фізичної природи (механічну та гідравлічну). Таким чином, вирі-

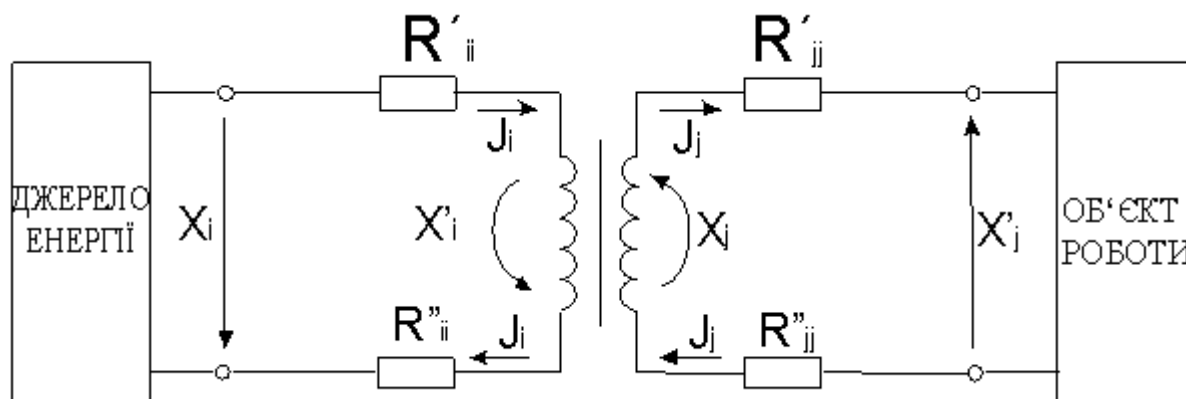


Рисунок 1 — Схема заміщення енергетичного перетворювача

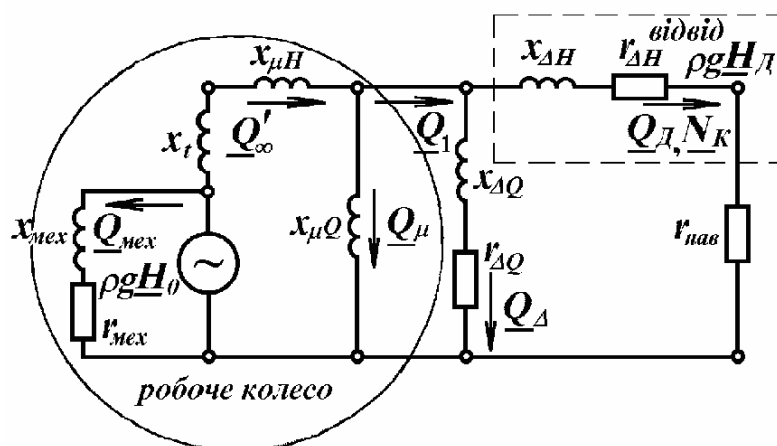


Рисунок 2 — Повна комплексна схема заміщення ВН

шення цієї задачі можливе лише з позицій системного міждисциплінарного підходу, одним із напрямків якого є термодинамічний аналіз роботи довільних енергетичних перетворювачів [7].

Аналіз результатів останніх досліджень

Існує велика кількість законів, котрі описують незворотні фізичні процеси у вигляді пропорційних співвідношень. До них відносяться: закон Фур'є, закон Фіка, закон Ома, закон Дарсі, закон Ньютона тощо [5]. Термодинамічний підхід теж реалізує принцип пропорційності, із тією тільки відмінністю, що він може поєднувати енергетику різних фізичних підсистем. Підвалини формування такого підходу були закладені в наукових працях С.Карно (1824), Р.Клаузіуса (1876), Дж. Гіббса (1875) та інших. Однак у вказаних класичних працях розглядалися лише стаціонарні процеси енергоперетворень. Тільки в 1931 році Л.Онсагером були представлені основні принципи сучасної термодинаміки із врахуванням швидкості зміни процесів в часі. Свою формальну теорію швидкості фізико-хімічних процесів він створив на основі рівняння швидкості виникнення ентропії. Основний принцип постулату Онсагера

встановлює лінійний зв'язок між термодинамічними потоками J та силами X , які діють в системі.

Система термодинамічних рівнянь для довільного перетворювача енергії, схема якого зображена на рис.1, в загальному випадку має вигляд

$$\begin{aligned}\overline{J_i} &= L_{i\ddot{i}} \cdot \overline{X_i} + L_{ij} \cdot \overline{X_j}, \\ \overline{J_j} &= L_{j\ddot{j}} \cdot \overline{X_j} + L_{ji} \cdot \overline{X_i}.\end{aligned}\quad (1)$$

де: $\overline{X_i}, \overline{X_j}, \overline{J_i}, \overline{J_j}$ – відповідно термодинамічні сили та потоки на вході та виході системи;

L_{ij} – феноменологічні (кінетичні) коефіцієнти, які враховують дію різноманітних ефектів (термоелектричних, термодифузійних, термо-механічних) що утворюються при накладанні і взаємодії декількох фізичних процесів

Оскільки більшість систем у природі – нелінійні, то нелінійність процесу зосереджена в феноменологічних коефіцієнтах, які відображають процеси переносу та розсіювання енергії. Дана система рівнянь описує енергетичні перетворення для чотириполосника [8].

Огляд літературних джерел засвідчив, що лише за останнє десятиліття зроблено спроби моделювання довільного перетворювача енергії з використанням узагальненого термодинаміч-

ного підходу, зокрема зображеного в працях Щура І.З., Еткіна В.А., Сафонова М.С. [6,9,10]. Але конкретних результатів в області гідромеханіки не одержано. Передумовою створення ефективної термодинамічної моделі ВН є також робота [1], в якій на основі теорії кіл Кірхгофа [3] запропонована схема заміщення гідромашини (рис. 2), що оперує із зосередженими комплексними параметрами.

Реактивні опори x_i в цій схемі характеризують внутрішній енергообмін у машині, викликаний силами інерції, в той час як активні опори r_i – незворотні процеси, спричинені силами тертя та дисипації теплової енергії у доквілля. Так опори $x_{мех}$ та $r_{мех}$ враховують механічні втрати, x_t – внутрішній гідроопір ВН, $x_{\mu H}$ та $x_{\mu Q}$ – вплив скінченої кількості лопатей на витрату і напір машини, $x_{\Delta Q}$ та $r_{\Delta Q}$ – об’ємні втрати у насосі, $x_{\Delta H}$ та $r_{\Delta H}$ – гідравлічні втрати у спіральному відводі, $r_{нав}$ – гідроопір напірного тракту гідромережі, \underline{H}_0 , \underline{Q}'_∞ – напір та витрата ідеалізованого ВН, \underline{Q}_μ та \underline{Q}_Δ – об’ємні втрати рідини, спричинені відповідно скінченою кількістю лопатей та зворотними зв’язками через ущільнення та байпаси, \underline{Q}_D та \underline{H}_D – витрата і напір на виході насоса.

Задачі досліджень

Метою роботи є застосування термодинамічної моделі ВН для аналізу його роботи. Побудова енергетичної характеристики для усталеного режиму та визначення параметрів ефективної та стійкої роботи цієї машини.

Виклад основного матеріалу

Взявши за основу повну комплексну схему заміщення ВН і провівши нескладні математичні перетворення ми отримаємо схему активного чотириполіусника [3]. Отриману заступну схему ВН в подальшому легше аналізувати на основі термодинамічного підходу (рис. 3).

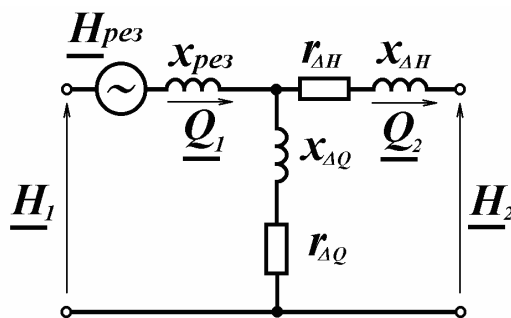


Рисунок 3 — Схема заміщення ВН

Для спрощення аналізу роботи ВН знехтуємо підпірним напором $H_1 = 0$. Тому напір, який створюється електричним двигуном, буде рівний напору на відповідному патрубку насоса. Такий підхід до аналізу роботи ВН дає змогу розглядати одержану схему як пасивний чотириполіусник. Узагальнивши вітки заступної схеми ВН комплексними опорами $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ отримаємо Т-подібний, чітко виражений пасивний чотириполіусник, який зображено на рис. 4.

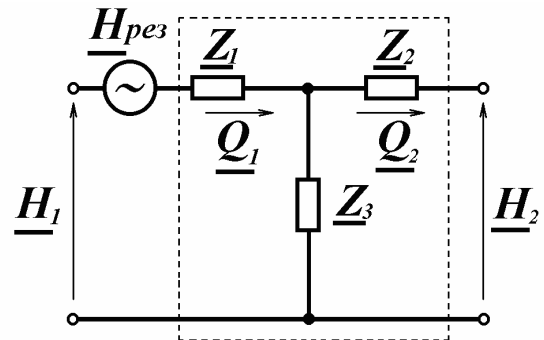


Рисунок 4 — Пасивний чотириполіусник

Повні комплексні опори визначаємо через розрахункові параметри повної комплексної схеми заміщення ВН за формулами [3]

$$\underline{Z}_1 = jx_{рез}, \quad (2)$$

$$\underline{Z}_2 = r_{\Delta H} + jx_{\Delta H}, \quad (3)$$

$$\underline{Z}_3 = r_{\Delta Q} + jx_{\Delta Q}, \quad (4)$$

де $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ – повні комплексні опори пасивного чотириполіусника

Результати розрахунків параметрів для ВН у відносних одиницях, де базовими вибрані дійсні номінальні параметри гідромашини, наведені в табл. 1.

Володіючи внутрішньою схемою з’єднань чотириполіусника та комплексними значеннями опорів, можна скласти систему рівнянь, яка описує його роботу. Існує багато форм опису системи рівнянь, але однією із найбільш вживаних є А-форма запису.

$$\left. \begin{aligned} \underline{H}_{рез} &= \underline{A}\underline{H}_2 + \underline{B}\underline{Q}_2, \\ \underline{Q}_1 &= \underline{C}\underline{H}_2 + \underline{D}\underline{Q}_2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Відомо, що для будь-якого пасивного чотириполіусника можна знайти комплексні термодинамічні коефіцієнти $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$, які встановлюють зв’язок між вхідними та вихідними параметрами схеми. Комплексні коефіцієнти для Т-подібної заступної схеми залежать від схеми внутрішніх з’єднань чотириполіусника, значень опорів та частоти, визначаємо їх за відомими формулами [3], результати розрахунку зводимо в табл. 2. Для будь-якого чотириполіусника термодинамічні коефіцієнти $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ можна визначити і дослідним шляхом і аналітичним. Коефіцієнти пов’язані математичним співвідношенням, котре повинно виконуватись для кожного пасивного чотириполіусника.

Таблиця 1 — Параметри Т-подібної заступної схеми ВН

Марка відцентрового насоса	\underline{Z}_1	\underline{Z}_2	\underline{Z}_3
НМ 1250-260	j0.05	0.005+j0.44	24.95+j11.6
НМ 2500-230	j0.137	0.002+j0.424	28.64+j21.14
НМ 3600-230	j0.293	0.001+j0.415	28.06+j26.46
НМ 5000-210	j0.459	0.00081+j0.407	27.67+j32.43
НМ 7000-210	j0.59	0.00053+j0.398	25.04+j36.74
НМ 10000-210	j0.796	0.00031+j0.39	21.72+j40.42
12Н-10*4	j0.32	0.001+j0.468	32.94+j10.89
10Н-8*4	j0.131	0.002+j0.482	29.19+j7.36
8МБ-9*2	j0.189	0.003+j0.489	30.18+j6.56
24DVS-D	j0.614	0.00053+j0.398	25.04+j36.73
24НД-14*1	j0.475	0.00096+j0.413	28.53+j28.8
20НД-12*1	j0.197	0.002+j0.419	26.81+j22.35
16НД-10*1	j0.258	0.002+j0.428	28.53+j19.34
14Н-12*2	j0.471	0.00098+j0.454	36.29+j15.49
12НД-11*2	j0.257	0.003+j0.45	33.72+j14.4
10НД-10*2	j0.073	0.005+j0.458	30.34+j10.47

Таблиця 2 — Комплексні коефіцієнти пасивного чотириполюсника для ВН

Марка відцентрового насоса	\underline{A}	\underline{B}	\underline{C}	\underline{D}
НМ-1250-260	1.001+j0.002	0.004+j0.49	0.033-j0.015	1.007+j0.014
НМ-2500-230	1.002+j0.003	0.000833+j0.562	0.023-j0.017	1.007+j0.01
НМ-3600-230	1.005+j0.006	0.000964+j0.71	0.019-j0.018	1.007+j0.008
НМ-5000-210	1.008+j0.007	-0.002+j0.869	0.015-j0.018	1.007+j0.006
НМ-7000-210	1.011+j0.007	-0.002+j0.992	0.013-j0.019	1.007+j0.005
НМ-10000-210	1.015+j0.008	-0.003+j1.192	0.01-j0.019	1.007+j0.004
12Н-10*4	1.003+j0.009	-0.003+j0.79	0.027-j0.009	1.004+j0.013
10Н-8*4	1.001+j0.004	0.0000088+j0.613	0.032-j0.008	1.004+j0.016
8МБ-9*2	1.001+j0.006	0.000143+j0.579	0.032-j0.007	1.003+j0.015
24DVS-D	1.011+j0.008	-0.003+j1.017	0.013-j0.019	1.007+j0.005
24НД-14*1	1.008+j0.008	-0.002+j0.891	0.017-j0.018	1.007+j0.007
20НД-12*1	1.004+j0.004	0.000031+j0.617	0.022-j0.018	1.008+j0.009
16НД-10*1	1.004+j0.006	0.000376+j0.688	0.024-j0.016	1.007+j0.01
14Н-12*2	1.005+j0.011	-0.004+j0.927	0.023-j0.01	1.005+j0.011
12НД-11*2	1.003+j0.006	0.000195+j0.708	0.025-j0.011	1.005+j0.011
10НД-10*2	1.001+j0.002	0.004+j0.532	0.029-j0.01	1.005+j0.013

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1. \quad (6)$$

Із системи рівнянь чотириполюсника (5) ми одержуємо рівняння напірної характеристики ВН в комплексній формі, записане із використанням коефіцієнтів

$$\underline{H}_D = \frac{1}{\underline{A}} \cdot \underline{H}_{рез} - \frac{\underline{B}}{\underline{B}} \cdot \underline{Q}_D, \quad (7)$$

де $\underline{Q}_D, \underline{H}_D$ — значення витрати та напору на вихідному патрубку ВН.

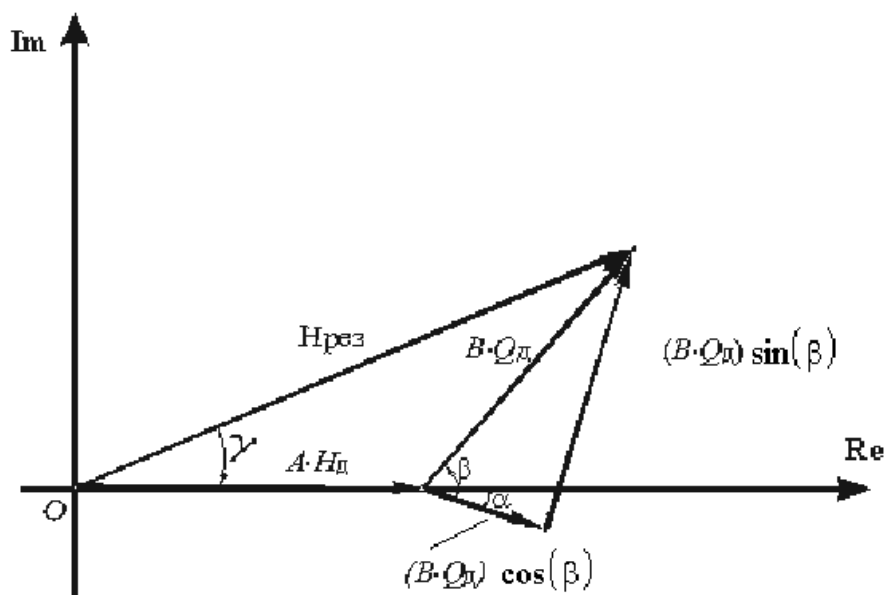


Рисунок 5 — Векторна діаграма режимів ВН

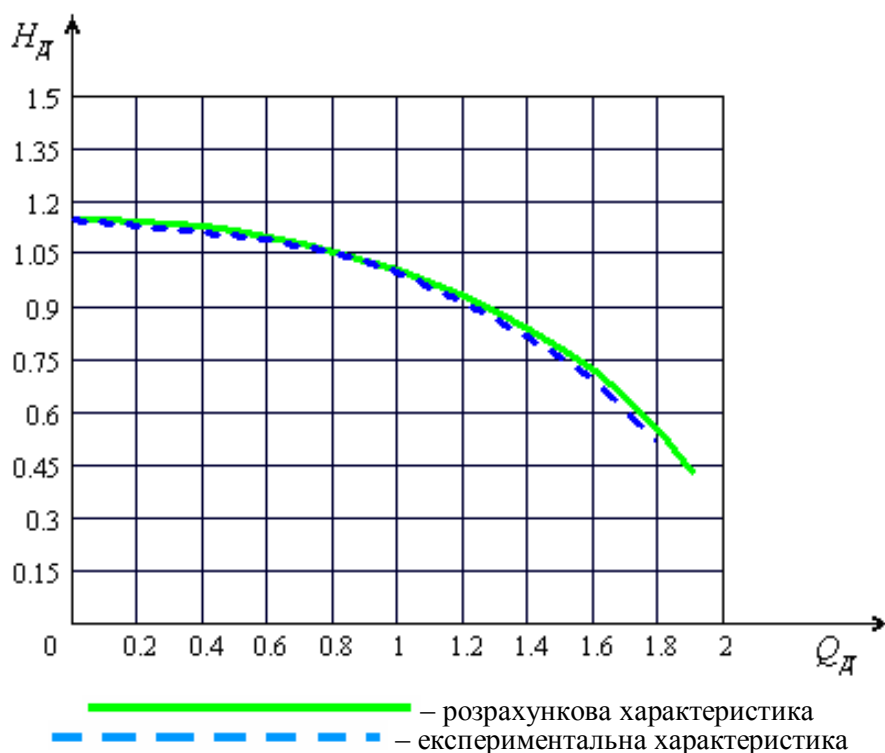


Рисунок 6 — Розрахункова напірна характеристика насоса НМ-2500-230

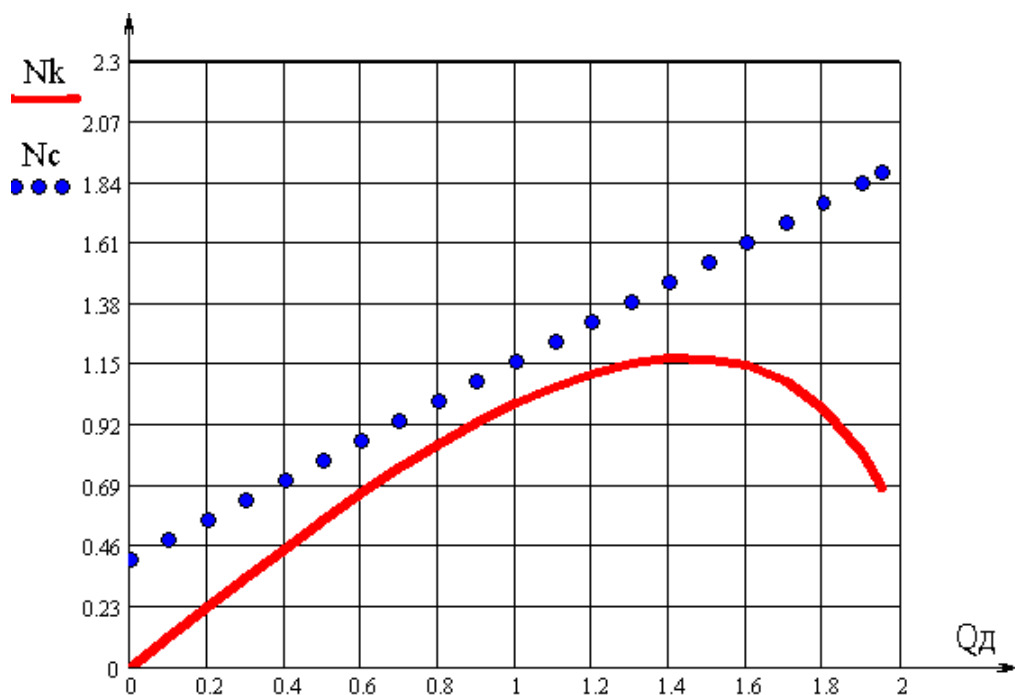
Рівнянню (7) відповідає зображена на комплексній площині векторна діаграма режимів ВН рис.5

Використовуючи тригонометричні співвідношення можна записати скалярне рівняння для визначення напірної характеристики ВН

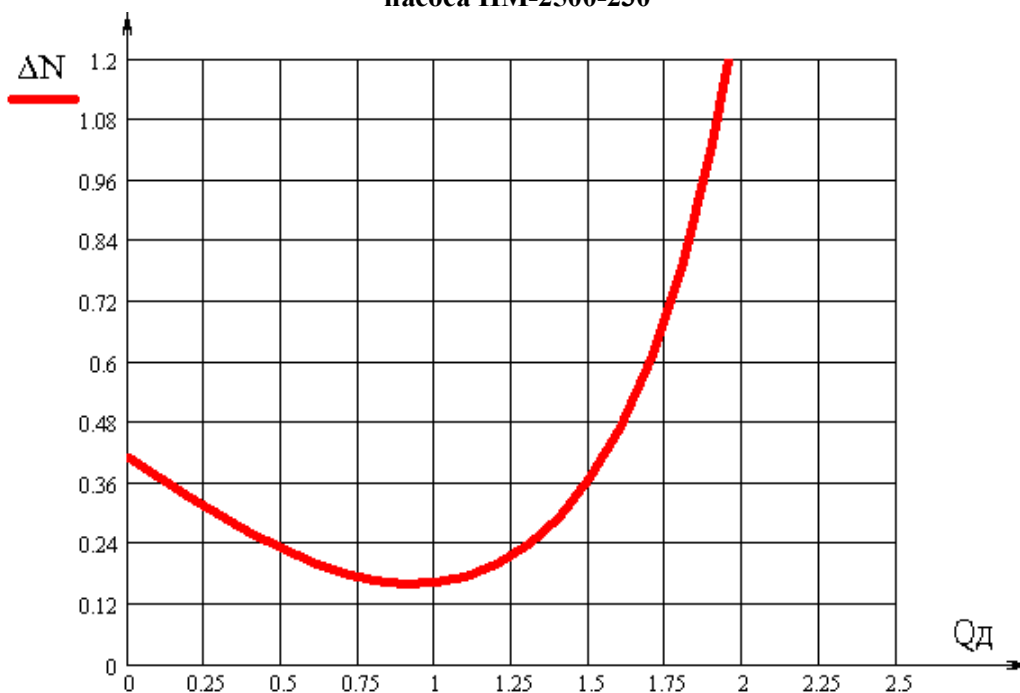
$$H_{\text{д}} = \frac{1}{A} \left[\sqrt{(H_{\text{рез}})^2 - (B \cdot Q_{\text{д}} \cdot \sin(\beta - \alpha))^2} - B \cdot Q_{\text{д}} \cdot \cos(\beta - \alpha) \right]. \quad (8)$$

Аналізуючи роботу ВН на основі векторної діаграми можна встановити, що існує два край-

ніх режими роботи – неробочого ходу ($Q_{\text{д}}=0$) та умовного обриву трубопроводу ($H_{\text{д}}=0$); в межах яких функціонує машина. Аналогом таких явищ можуть слугувати відповідно режими неробочого ходу та короткого замикання в електричних машинах, де силові та швидкісні параметри (струм та напруга). Порівняння розрахованої за допомогою термодинамічної моделі та отриманої експериментально напірних характеристик магістрального насоса НМ-2500-230 (рис. 6), свідчить про їх належну збіжність, що підтверджує правильність запропонованого підходу.



Рисунік 7 — Розрахункові характеристики корисної N_k та спожитої N_c потужності насоса НМ-2500-230



Рисунік 8 — Характеристика втрат потужності насоса НМ-2500-230

Крім того, термодинамічна модель ВН дає змогу досліджувати втрати потужності в машині, тобто проводити аналіз ефективності її роботи шляхом дослідження втрат потужності.

$$\Delta N = N_c - N_k, \quad (9)$$

де N_c , N_k – відповідно корисна (гідралічна), спожита з валу двигуна потужності ВН.

На рис. 7 зображені залежності зміни потужності N_k та N_c залежно від витрати ВН Q_d .

До недавнього часу вважалося, що корисна потужність ВН має прямопропорційну залежність від витрати. Проаналізувавши ці характе-

ристики можна стверджувати, що залежність втрат потужності ΔN від витрати Q_d має чітко виражений екстремум в області оптимального режиму роботи (рис. 8).

Під час значного перевищення номінального значення витрати, втрати потужності починають різко зростати. Такий характер поведінки свідчить про те, що витрачена на роботу ВН енергія використовується неефективно. Також цей режим роботи є небезпечний для конструкції машини, оскільки він супроводжується появою та наростанням кавітаційних про-



Рисунок 9 — Залежність ККД насоса НМ-2500-230

цесів, здатних порушити стійкість роботи ВН. Термодинамічна модель насоса уможливило побудову характеристик ККД (рис. 9) за методикою [1].

Очевидно, що максимальна ефективність ВН буде досягатись в режимі номінального навантаження.

Висновки

1. На основі термодинамічного підходу створена модель ВН для аналізу надійності та ефективності його роботи.

2. Проілюстровано належну збіжність розрахунків за допомогою термодинамічної моделі та отриманих експериментально напірних характеристик ВН магістральних нафтопроводів.

3. Проведено аналіз енергетичних параметрів усталеного режиму роботи ВН. Встановлено, що втрати потужності під час роботи ВН змінюються і мають чітко виражений екстремум функції $\Delta N = f(Q_D)$, який відповідає оптимальному режиму роботи.

Література

1 Костишин В.С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогидравлічної аналогії. — Івано-Франківськ: Факел, 2000. — 163 с.

2 Костишин В.С., Николин П.М. Представлення відцентрового насоса у вигляді чотириполюсника // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2006. — №3. — С.76-80.

3 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1973. — 752 с.

4 Мамедов М.М. Феноменологический вывод соотношений взаимности Онзагера. <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/pjtf/2003/16/p39-44.pdf>

5 Эткин В.А. На стыке естественных наук. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/_nastykaxestestvennykh_nayk-1.shtml

6 Эткин В.А. Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии. — Тольятти, 1999. — 216 с.

7 Вейник А.И. Термодинамика необратимых процессов. — Минск: Наука и техника, 1966. — 360 с.

8 Коган И.Ш. "Физические аналогии" — не аналогии, а закон природы. — 2004.

<http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7438.htm>

9 Сафонов М.С. Метод интегральных уравнений баланса потоков массы, энергии и эксергии в анализе химико-технологических систем. — М., 2003. — 45 с.

10 Щур І.З. Електропривод з двигуном постійного струму послідовного збудження як термодинамічний перетворювач енергії // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". — 2002. — № 449. — С.204-212.